

На правах рукописи



БОЧКОВА ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО И ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНОВ С ФОРМИРУЮЩИМИСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
АГЛОМЕРАТАМИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ
МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ**

01.04.03– Радиофизика,
05.27.01– Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро– и наноэлектроника, приборы на квантовых
эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2019

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научные руководители:

доктор физико–математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Усанов Дмитрий Александрович

кандидат физико–математических наук

Постельга Александр Эдуардович

Официальные оппоненты:

Быков Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, Группа компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс (НТ-МДТ СИ), г. Москва, г. Зеленоград, Почетный президент

Розанов Константин Николаевич, доктор физико-математических наук, с.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, г. Москва, зам. директора по научной работе

Ведущая организация:

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 на базе Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус СГУ, 34 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета имени Н.Г.Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан « » октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Достижения в области радиофизики и твердотельной электроники стимулировали развитие исследований многокомпонентных магнитных сред, с характеристиками, управляемыми внешними магнитными и электрическими полями, к которым и относятся магнитные жидкости [1–3].

Уникальность свойств жидких намагничивающихся сред открыла многообразные возможности их применения в различных отраслях: машиностроении, медицине и технике. В связи с этим изучению магнитных жидкостей уделено достаточно большое внимание отечественных и зарубежных ученых (Розенцвейг Р., Гехт Р.С., Шлиомис М.И., Райхер Ю.Л., Степанов В.И., Vacri J.C., Krueger D.A. и др.).

Физические свойства магнитных жидкостей во многом определяются взаимодействием ферромагнитных однодоменных частиц между собой и с внешними электрическими и магнитными полями, что может приводить к возникновению структурных эффектов, к которым можно отнести агломерацию – объединение ферромагнитных частиц в нитевидные образования.

В магнитных жидкостях в качестве матрицы, содержащей ферромагнитные включения, используются как полярные, например, вода, так и неполярные, например, керосин, жидкости. В магнитной жидкости на основе воды были исследованы процессы структурообразования и определены пороговые поля, при которых происходит качественное изменение в характере зависимости размеров агломератов магнитных частиц от величины приложенного магнитного поля [4], однако влияние этого процесса на изменение характера взаимодействия электромагнитных волн с такой магнитной средой установлено не было. Для магнитной жидкости на основе керосина с нанометровыми ферромагнитными частицами процесс агломерации ранее детально не исследовался, а именно, не исследовались количественные характеристики образующихся агломератов под действием магнитного поля с индукцией до 1,2 Тл. Поскольку керосин, используемый в качестве жидкости-носителя, характеризуется отсутствием частотной дисперсии коэффициента отражения в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, то частотные характеристики коэффициента отражения СВЧ-излучения от магнитной жидкости в этом случае определяются в основном свойствами ферромагнитных наночастиц и образующихся в магнитном поле агломератов.

Исследование закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и оптического диапазонов с формирующимися в магнитном поле агломератами ферромагнитных наночастиц, входящими в состав магнитной жидкости, с использованием радиофизических моделей распространения и трансформации электромагнитной волны в многокомпонентных магнитных средах представляет несомненный научный и практический интерес при разработке управляемых магнитным полем элементов СВЧ-техники и оптических устройств.

Особое место при контроле параметров магнитной жидкости находят СВЧ-методы благодаря достаточно высокой прозрачности магнитной жидкости в этом диапазоне длин волн и высокой точности измерительной аппаратуры. Известны исследования, посвященные определению таких параметров магнитной

жидкости, как диаметр ферромагнитных частиц, объемная доля твердой фазы и диэлектрическая проницаемость по результатам измерения частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения и решения обратной задачи [2, 5–7]. Однако в вышеприведенных работах не наблюдалось полного согласования теоретически рассчитанных и экспериментально полученных спектров отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от слоя магнитной жидкости, помещенной в измерительную систему, что, в свою очередь, при решении обратной задачи приводило к трудноконтролируемой погрешности в результатах измерений.

Более корректное теоретическое описание взаимодействия электромагнитного излучения с магнитной средой, содержащей намагниченные агломераты ферромагнитных наночастиц, а также построение модели формирования таких агломератов во внешнем магнитном поле, в свою очередь, открывает возможность увеличения точности экспериментального определения параметров таких ферромагнитных наночастиц при использовании СВЧ-методов измерений, что является предметом исследований в области твердотельной электроники.

Определение параметров магнитной жидкости интересно как в фундаментальном отношении, так и с прикладной точки зрения. Одно из перспективных направлений – применение магнитной жидкости в качестве материала, используемого для создания сред, характеристиками которых можно управлять внешними магнитными полями. Это, в свою очередь, открывает перспективы, например, для создания оптоэлектронных приборов с магнитным управлением, в которых амплитудная модуляция линейно поляризованного излучения оптического диапазона достигается изменением направления внешнего магнитного поля. Для увеличения глубины модуляции в настоящей работе предложено использование композита на основе магнитной жидкости и проводящих низкоразмерных углеродных структур, например, нанотрубок. Применение такого рода композитов позволяет увеличить в несколько раз глубину модуляции поляризованного оптического излучения по сравнению с магнитной жидкостью без нанотрубок.

В настоящей работе проведено более точное теоретическое описание взаимодействия СВЧ-излучения с магнитной жидкостью с учетом формирующихся в магнитном поле агломератов ферромагнитных наночастиц, что актуально не только для разработки перспективных элементов СВЧ-техники и оптики на основе многокомпонентных магнитных сред с характеристиками, управляемыми внешними магнитными и электрическими полями, но и разработки СВЧ-метода, позволяющего повысить точность измерения параметров магнитной жидкости и входящих в её состав ферромагнитных наночастиц, на основе использования частотных зависимостей коэффициента отражения зондирующего электромагнитного излучения при нескольких значениях температур.

Цель диссертационной работы:

Выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и оптического диапазонов с формирующимися в магнитном поле агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости и их использование для определения параметров магнитной жидкости в результате решения обратной задачи и повышения эффективности модуляции поляризован-

ного оптического излучения, взаимодействующего с магнитной жидкостью с нанотрубками, во внешнем магнитном поле с переменным направлением.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи**:

1. Анализ современного состояния исследований магнитных жидкостей, их структурных преобразований в магнитном поле и методов определения ее параметров.

2. Экспериментальное исследование процесса структурной организации и динамики агломерации магнетитовых наночастиц магнитной жидкости в широком диапазоне воздействия приложенных магнитных полей.

3. Установление характерных особенностей в изменении зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины индукции приложенного магнитного поля, носящих пороговый характер и обусловленных изменением размеров агломератов, образованных однодоменными ферромагнитными наночастицами, их концентрацией и величиной намагниченности.

4. Разработка теоретической модели взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с ферромагнитными наночастицами, входящими в состав магнитной жидкости, помещенной в измерительную установку, на основе теории возмущений, корректно описывающей учет образующихся агломератов, их размеры и наличие оболочек поверхностно-активных веществ (ПАВ) магнитных частиц в магнитной жидкости во внешнем магнитном поле при расчете коэффициента отражения СВЧ-излучения от слоя магнитной жидкости, полностью заполняющей поперечное сечение волновода.

5. Проведение многопараметровых измерений магнитной жидкости (определение среднего диаметра магнетитовых наночастиц, объемной доли твердой фазы, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь) с использованием частотной зависимости коэффициента отражения сверхвысокочастотного излучения с учетом образованных агломератов ферромагнитных наночастиц при нескольких значениях температур.

6. Экспериментальная реализация способа модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения полупроводникового лазера, проходящего через магнитную жидкость, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением вектора магнитной индукции и величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц с размером, превышающем длину волны оптического излучения.

7. Экспериментальное определение глубины модуляции интенсивности поляризованного излучения лазера при различных концентрациях нанотрубок в суспензии магнитной жидкости, состоящей из агломератов и нанотрубок.

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

1. Показано, что средний размер агломератов, образующихся в магнитной жидкости на основе керосина с диаметром феррочастиц $d = 5 \div 10$ нм, стабилизированных олеиновой кислотой, объемной долей твердой фазы $\varphi = 0,1$ во внешнем магнитном поле с величиной магнитной индукции до $0,1$ Тл составляет 38 мкм и увеличивается до 248 мкм в магнитных полях, больших $0,13$ Тл, при комнатной температуре.

2. Установлены характерные особенности в изменении зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины индукции приложенного магнитного поля, носящие пороговый характер и обусловленные динамикой размеров агломератов наноразмерных магнетитовых частиц магнитной жидкости на основе керосина под воздействием приложенного магнитного поля с индукцией до 1,2 Тл, их концентрацией, ориентацией относительно компонент электромагнитной волны и величиной намагниченности.

3. В разработанной модели расчета коэффициента отражения СВЧ-излучения от слоя магнитной жидкости, полностью заполняющей поперечное сечение волновода, в приложенном магнитном поле, впервые учтено наличие агломератов ферромагнитных наночастиц в магнитной жидкости при решении обратной задачи, связанной с определением параметров магнитной жидкости (среднего диаметра магнетитовых наночастиц, объемной доли твердой фазы, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь).

4. Впервые разработан и экспериментально реализован метод модуляции интенсивности поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость, содержащую, наряду с агломератами магнитных наночастиц, нанотрубки, и установлен характер увеличения глубины модуляции при увеличении концентрации нанотрубок.

Новизна способа определения параметров магнитной жидкости подтверждается патентом на изобретение.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается соответствием выводов теории полученным экспериментальным результатам, правомочностью упрощающих допущений, сходимостью вычислительных процессов к искомым решениям. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена использованием стандартной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных согласно стандартным методам, корректностью использованных методик исследования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Установлено, что при комнатной температуре в магнитной жидкости на основе керосина с диаметром феррочастиц $d = 5 \div 10$ нм, стабилизированных олеиновой кислотой, объемной долей твердой фазы $\varphi = 0,1$ с ростом магнитной индукции в диапазоне от 0 до 0,02 Тл однодоменные ферромагнитные наночастицы объединяются в агломераты микронных размеров. При значениях индукции магнитного поля, больших 0,02 Тл, вплоть до значения индукции магнитного поля 0,1 Тл наблюдалось увеличение числа агломератов, при этом броуновское движение ферромагнитных наночастиц препятствует образованию агломератов, среднее значение длин которых превышает 38 мкм.

2. Определены характерные особенности изменения коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью в диапазонах изменения магнитного поля, характеризующихся процессами образования агломератов ферромагнитных наночастиц, увеличением концентрации агломератов при сохранении их среднего размера, увеличе-

нием размеров агломератов при уменьшении их числа и увеличением намагниченности агломератов при сохранении их размеров и концентрации.

3. Разработана методика определения и уточнения параметров магнитной жидкости с использованием спектров отражения сверхвысокочастотного излучения при нескольких значениях температур с учетом образованных агломератов ферромагнитных наночастиц.

4. Предложен метод модуляции интенсивности поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при изменении направления вектора индукции воздействующего магнитного поля, который может служить основой для создания магнитооптических модуляторов для передачи информации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины приложенного магнитного поля носит пороговый характер и обусловлена изменением размеров агломератов, образованных наноразмерными магнетитовыми частицами магнитной жидкости на основе керосина под воздействием приложенного магнитного поля с индукцией до 1,2 Тл, их концентрацией, ориентацией относительно компонент электромагнитной волны и величиной намагниченности агломератов ферромагнитных наночастиц.

2. Предложенная модель формирования структуры магнитной жидкости, характеризующейся наличием агломератов ферромагнитных наночастиц в магнитном поле с индукцией до 1,2 Тл, позволяет корректно описать особенности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с ферромагнитными наночастицами, входящими в состав магнитной жидкости.

3. Учет эффектов, обусловленных структурной организацией ферромагнитных наночастиц, и наличия у них оболочек поверхностно-активных веществ позволяет адекватно решить обратную задачу по определению параметров магнитной жидкости (среднего диаметра магнетитовых частиц, объемной доли твердой фазы, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) с использованием частотных зависимостей коэффициентов отражения в СВЧ-диапазоне.

4. При реализации метода модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения ($\lambda=650$ нм), проходящего через магнитную жидкость, при изменении направления вектора индукции магнитного поля с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц, добавление многостенных углеродных нанотрубок с длиной ~ 2 мкм, наружным 15–40 нм и внутренним диаметром 3–8 нм с концентрацией в диапазоне 10–40 г/л, позволяет увеличить глубину модуляции до 37 – 54%.

На защиту также выносятся способ определения параметров магнитной жидкости, защищенный патентом РФ.

Апробация работы. Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Саратовского государственного университета в период 2012–2019 годов. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на:

1. Всероссийских научных школах–семинарах «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». Саратов, 14–15 мая 2015 г., 18–19 мая 2017 г, 16–17 мая 2018 г., 16–17 мая 2019 г.
2. 18 Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. Плес, 4–7 сентября 2018 г.
3. XVI Международной научно–технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Миасс, 10–14 сентября 2018 г.
4. На семинарах кафедры физики твердого тела.

Исследования выполнялись в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности (базовая часть) 8.7628.2017/БЧ, код проекта 7628 по теме «Разработка новых типов функциональных устройств СВЧ, КВЧ и терагерцового диапазонов и методов диагностики с использованием ближнеполевой СВЧ-микроскопии на основе фотонных кристаллов», проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро– и наноструктурами и композитами» №16.1575.2014/К, шифр: «Наноскоп–2»; государственного задания Министерства образования и науки РФ НИР «Разработка на основе фотонных кристаллов СВЧ-методов контроля высокого разрешения параметров наноструктур и нанокомпозитов» на 2012–2014 годы, шифр «Нанокомплекс».

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, использованы в учебном процессе для подготовки студентов факультета нано– и биомедицинских технологий СГУ, обучающихся по направлениям бакалавриата и магистратуры «Физика», «Электроника и нанoeлектроника».

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, из них 3 статьи в журналах, включенных в базу данных Scopus и Web of Science, получен патент РФ, опубликованы 5 работ в сборниках статей по докладам на конференциях.

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, проектировании и практической реализации экспериментальных методов, проведении компьютерного моделирования и анализе его результатов, анализе полученных экспериментальных результатов, участии в формулировании научных положений и выводов.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 133 страницы машинописного текста, включая 42 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 155 наименований и изложен на 17 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе приведены результаты анализа современного состояния исследований магнитных жидкостей.

Во втором разделе исследовано формирование микроструктур в магнитной жидкости, представляющей собой однородную взвесь однодоменных частиц

магнетита в керосине, стабилизированных олеиновой кислотой, с диаметром феррочастиц $d = 5 \div 10$ нм и объемной долей твердой фазы $\varphi = 0,1$ в магнитном поле и влияние агломерации ферромагнитных наночастиц на взаимодействие электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с магнитной жидкостью.

Было проведено измерение размеров агломератов слоя магнитной жидкости объемом 0,1 мл, размещённого на площади 1 см^2 , в магнитном поле при комнатной температуре. Для получения количественных характеристик агломератов в магнитной жидкости была использована установка, состоящая из двух катушек Гельмгольца (рис. 1). Полученный под действием магнитного поля слой магнитной жидкости высушивался для лучшей возможности визуализации и фиксации агломератов. Исследование размеров агломератов осуществлялось с помощью оптического микроскопа HIROX KH-7700.

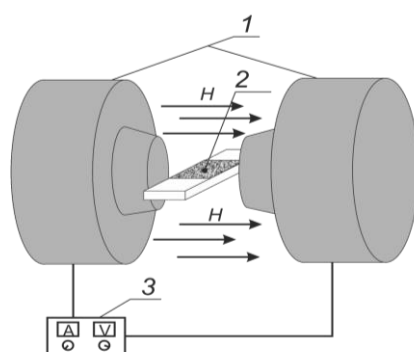


Рисунок 1 Схема экспериментальной установки: 1 – катушки электромагнита, 2 – магнитная жидкость, нанесенная на стеклянную подложку, 3 – блок питания электромагнита

На рис. 2 приведена зависимость длин агломератов l ферромагнитных наночастиц от величины индукции магнитного поля B в высушенном слое магнитной жидкости.

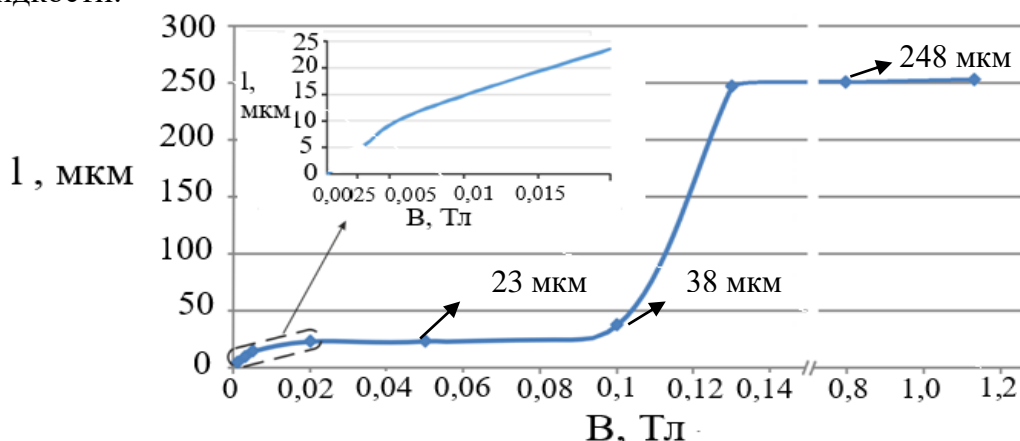


Рисунок 2 Зависимость длин агломератов ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости от величины магнитного поля в высушенном слое от 0 до 1,2 Тл

На вставке к рисунку видно, что при достижении порогового значения индукции магнитного поля 2,5 мТл среднее значение длин агломератов частиц с диаметром $d = 5 \div 10$ нм в магнитной жидкости составляло 5 мкм, и они становились различимыми в оптический микроскоп с разрешающей способностью порядка 1 мкм. При дальнейшем увеличении поля размеры агломератов ферромаг-

нитных наночастиц магнитной жидкости увеличивались, и их концентрация изменялась с $4,3 \cdot 10^2$ до $10,0 \cdot 10^2 \text{ мм}^{-3}$, причем средняя длина агломератов почти не изменялась, вследствие того что при значениях магнитной индукции выше 0,02 Тл подавляющее большинство частиц уже приняло участие в процессе агломерации. Броуновское движение ферромагнитных наночастиц препятствовало образованию агломератов, среднее значение длин которых превышает 38 мкм. При превышении значения индукции магнитного поля 0,1 Тл происходило резкое увеличение длин агломератов до 248 мкм, что сопровождалось значительным уменьшением их количества. Концентрация агломератов уменьшалась до $0,5 \cdot 10^2 \text{ мм}^{-3}$, ввиду того что возрастают силы магнитодипольного взаимодействия между агломератами ферромагнитных наночастиц, и отдельные агломераты с меньшими размерами объединялись друг с другом: при увеличении магнитного поля соседние агломераты сближались до критических расстояний и полного объединения.

Экспериментальные исследования зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с магнитной жидкостью, при различных значениях индукции внешнего магнитного поля выполнялись в диапазоне частот 27–34 ГГц. Схема установки приведена на рис.3.

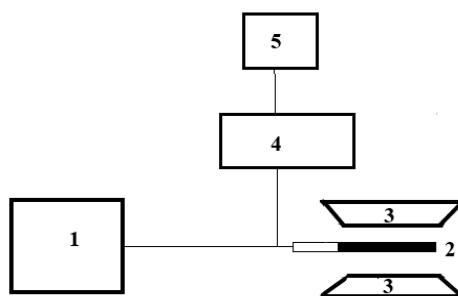


Рисунок 3 Схема установки для измерения зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения от приложенного магнитного поля: 1 – СВЧ-генератор (измеритель КСВН Р2-65(ГКЧ)), 2 – волноводный тракт, 3 – электромагнит, 4 – панорамный измеритель КСВН и ослабления Я2Р-67, 5 – компьютер

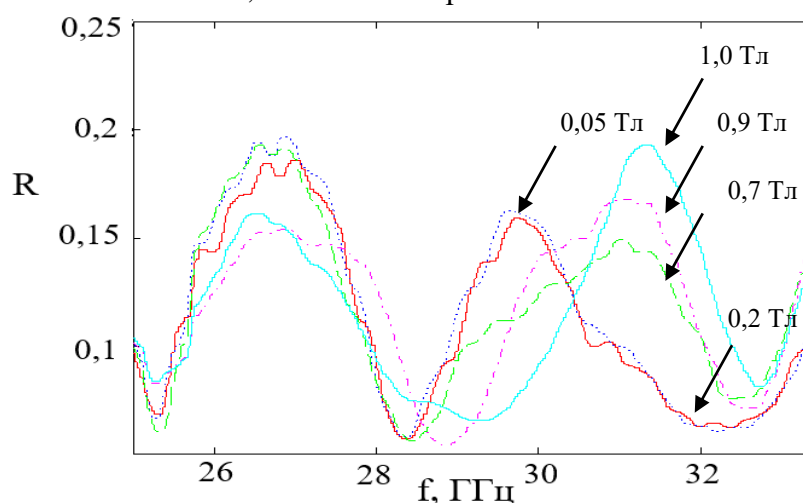


Рисунок 4 АЧХ коэффициентов отражения электромагнитного излучения 8-ми миллиметрового диапазона длин волн от слоя магнитной жидкости, ограниченного диэлектрической вставкой, при различных значениях индукции внешнего магнитного поля

На рис. 4 представлены АЧХ коэффициентов отражения R электромагнитного излучения 8-ми миллиметрового диапазона длин волн от полубесконечного слоя магнитной жидкости, ограниченного диэлектрической фторопластовой вставкой толщиной 20 мм, в волноводе при различных значениях индукции внешнего магнитного поля.

Зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения 8-ми миллиметрового диапазона длин волн от полубесконечного слоя магнитной жидкости, ограниченного диэлектрической вставкой, от величины индукции магнитного поля на различных частотах зондирующего электромагнитного излучения представлены на рис.5.

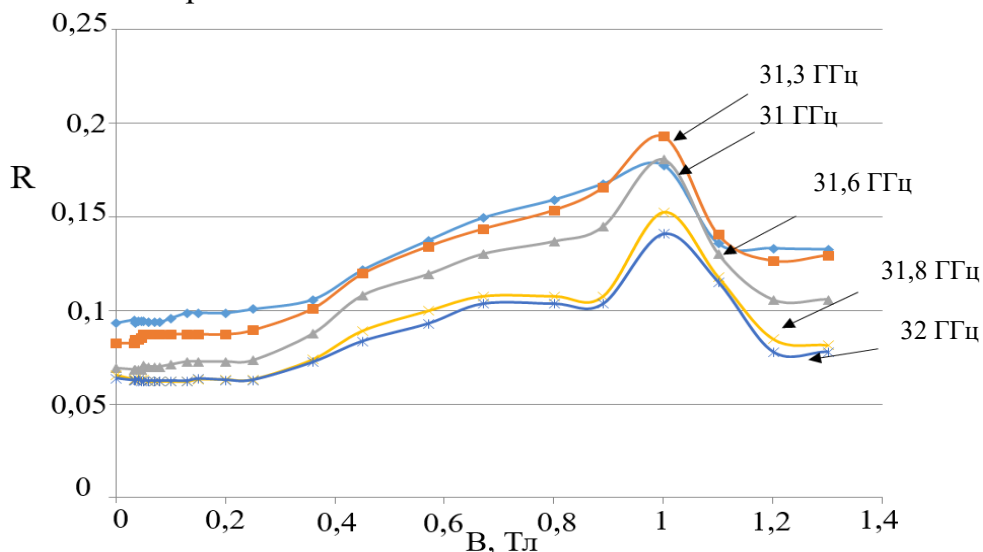


Рис.5 Зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения 8-ми миллиметрового диапазона длин волн от полубесконечного слоя магнитной жидкости, ограниченного диэлектрической вставкой, от величины индукции магнитного поля на различных частотах зондирующего электромагнитного излучения

Из анализа полученных экспериментальных данных сделан вывод, что зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины приложенного магнитного поля носит пороговый характер. При этом величина порогового магнитного поля превышает величину 0,2 Тл, при которой агломераты магнитной жидкости достигают предельных размеров. Дальнейшее значительное изменение коэффициента отражения с ростом магнитного поля обусловлено изменением намагниченности агломератов ферромагнитных наночастиц.

Таким образом, установлено, что процессы структурообразования в исследуемой магнитной жидкости под действием внешнего магнитного поля, приводящие к возникновению агломератов ферромагнитных наночастиц и изменению намагниченности магнитной жидкости, носят пороговый характер. При этом зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с такой магнитной жидкостью, от величины приложенного магнитного поля также носит пороговый характер, что обусловлено изменением размеров агломератов, образованных наноразмерными магнетитовыми частицами магнитной жидкости на основе ке-

росина под воздействием приложенного магнитного поля с индукцией до 1,2 Тл, их концентрацией, ориентацией относительно компонент электромагнитной волны и величиной намагниченности агломератов ферромагнитных наночастиц.

В третьем разделе предложена модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с формирующимися в магнитном поле агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости, их пространственным расположением и наличием оболочек ПАВ на ферромагнитных наночастицах, которая более точно, по сравнению с моделью высокочастотного намагничивания ансамбля невзаимодействующих изотропных суперпарамагнитных частиц [2, 5–7], согласует теоретически рассчитанные и экспериментально полученные спектры отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от слоя магнитной жидкости, помещенной в измерительную систему, что, в свою очередь, приводит к увеличению точности при определении параметров магнитной жидкости (среднего диаметра магнетитовых частиц, объемной доли твердой фазы, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) в ходе решения соответствующей обратной задачи.

Для измерения коэффициента отражения электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне для увеличения чувствительности по измеряемым параметрам применялся мостовой метод с использованием двойного волноводного тройника, в измерительное плечо которого помещался слой магнитной жидкости, полностью заполняющий поперечное сечение волновода. Схема радиоинтерференционной установки изображена на рис. 6.

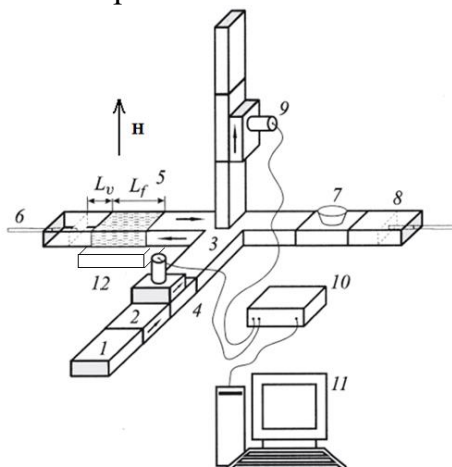


Рисунок 6 Схема установки для эксперимента по исследованию частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне от слоя магнитной жидкости: 1 – СВЧ-генератор, 2 – вентиль, 3 – двойной волноводный тройник, 4, 9 – полупроводниковые СВЧ-диоды, 5 – магнитная жидкость, 6, 8 – короткозамыкающие поршни, 7 – аттенюатор, 10 – АЦП, 11 – ПК, 12 – кювета с жидким азотом

Расчет параметров производится в ходе решения обратной задачи. При решении находились такие значения параметров, при которых функция невязки S становится минимальной.

$$S(d, \phi, \epsilon, tg\delta, l) = \sum_{i=1}^n ((R(\omega_i, d, \phi, tg\delta, l) - R_{exp}(\omega_i))^2), \quad (1)$$

$$R = \frac{\gamma_0^2 sh(\gamma L_f)(1 + e^{-2\gamma_0 L_v}) - 2\gamma\gamma_0 ch(\gamma L_f)e^{-2\gamma_0 L_v} - \gamma^2 sh(\gamma L_f)(1 - e^{-2\gamma_0 L_v})}{\gamma^2 sh(\gamma L_f)(1 + e^{-2\gamma_0 L_v}) + 2\gamma\gamma_0 ch(\gamma L_f) + \gamma^2 sh(\gamma L_f)(1 - e^{-2\gamma_0 L_v})} \quad (2)$$

где γ_0 – постоянная распространения СВЧ-волны в пустой части волновода, γ – постоянная распространения на участке волновода, полностью заполненном магнитной жидкостью, L_v – расстояние до короткозамыкающего поршня, L_f – толщина слоя магнитной жидкости, R_{exp} – экспериментальные значения (n шт.) коэффициента отражения для различных частот ω_i , R – теоретически рассчитанный коэффициент отражения для различных частот ω_i , d , φ , ε , $tg\delta$ – средний диаметр магнетитовых частиц, объемная доля твердой фазы, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь магнитной жидкости, соответственно, l – эффективная длина агломератов, n – количество экспериментальных значений. Вывод соотношения (2), определяющего коэффициент отражения R электромагнитной волны от слоя магнитной жидкости L_f , приводится в [6].

Искомые значения параметров магнитной жидкости (среднего диаметра магнетитовых наночастиц, объемной доли твердой фазы, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь) определяются численным методом в результате решения системы уравнений для частных производных функции $S(d, \varphi, \varepsilon, tg\delta, l)$ по каждому из искомых параметров, приравненных к нулю.

Для расчета коэффициента отражения R с использованием выражения (2) была определена постоянная распространения $\gamma = \gamma_{эфф}$ на участке волновода, полностью заполненном магнитной жидкостью, содержащей агломераты ферромагнитных наночастиц.

Для учета распределения агломератов ферромагнитных частиц вдоль волновода рассматривалась эквивалентная структура слоя (длиной L_f) магнитной жидкости с агломератами, вид которой приведен на рис.7.

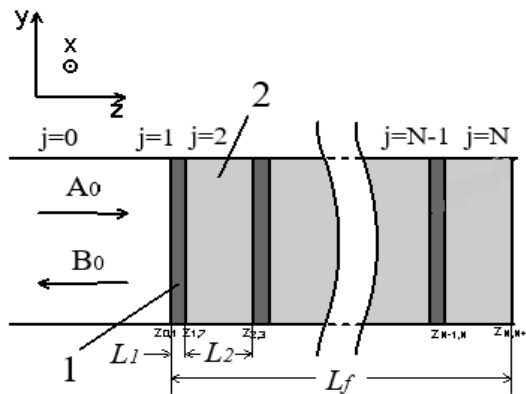


Рисунок 7 Эквивалентная структура слоя магнитной жидкости с агломератами: 1 – участок волновода с агломератами ферромагнитных наночастиц, которые образуются в магнитной жидкости при приложении магнитного поля; 2 – участок волновода с магнитной жидкостью без агломератов

Объем магнитной жидкости с агломератами представлялся в виде многослойной структуры (см. рис. 7), состоящей из множества чередующихся слоев

магнитной жидкости с агломератами ферромагнитных наночастиц, которые образуются в магнитной жидкости при приложении магнитного поля, толщиной L_1 и магнитной жидкости без агломератов с уменьшенным значением объемной доли твердой фазы ϕ толщиной L_2 . Значения толщин были взяты из анализа изображений, полученных с помощью оптического микроскопа. Толщина слоя с агломератами L_1 принималась равной средней ширине агломератов 1 мкм. Всего использовалось $5 \cdot 10^2$ слоев ($L_1 + L_2$) толщиной 11 мкм с общим количеством агломератов 10^6 . Постоянные распространения в этих слоях γ_1 и γ_2 , соответственно.

Использование $\gamma_{\text{эфф}}$ для описания распространения электромагнитной волны на участке волновода, содержащем магнитную жидкость с агломератами ферромагнитных наночастиц, предполагает замену этого участка на участок волновода, заполненный однородной магнитной средой без агломератов, частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны от которого наиболее близка к частотной зависимости коэффициента отражения от участка с магнитной жидкостью с агломератами.

При таком подходе $\gamma_{\text{эфф}}$ находится из решения обратной задачи, при реализации которого функция невязки S_1 , в виде квадрата разности коэффициента отражения R_0 для магнитной жидкости без агломератов в виде однородной однослойной структуры толщиной L_f и коэффициента отражения R_{mm} от слоя магнитной жидкости, представленного в виде многослойной структуры, становится минимальной. В этом случае функция невязки S_1 имеет вид:

$$S_1(\gamma_{\text{эфф}}) = \sum_{i=1}^n ((R_0(\omega_i, d, \phi, \text{tg}\delta) - R_{mm}(\omega_i))^2), \quad (3)$$

$$\text{где } R_0 = \frac{(\gamma_0^2 - \gamma_{\text{эфф}}^2) \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{эфф}} L_f)}{(\gamma_0^2 + \gamma_{\text{эфф}}^2) \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{эфф}} L_f) + 2\gamma_{\text{эфф}} \gamma_0 \cdot \text{ch}(\gamma_{\text{эфф}} L_f)} - \text{коэффициент отражения}$$

от магнитной жидкости без агломератов в виде однородной однослойной структуры, R_{mm} – коэффициент отражения от слоя магнитной жидкости с агломератами, γ_0 – постоянная распространения в пустой части волновода.

Для расчета коэффициента отражения R_{mm} от слоя магнитной жидкости, представленного в виде многослойной структуры из чередующихся слоев L_1 и L_2 (см. рис. 7), методом матриц передачи была определена постоянная распространения волны $\gamma_1 = \gamma' + j\gamma''$ на участках L_1 , с использованием аппарата теории возмущения в виде [8]:

$$(\gamma' + j\gamma'') - \gamma_2 = \omega \frac{\int_{S_{\text{аэл}}} (\Delta \varepsilon \overline{E E_{10}} + \Delta \mu \overline{H H_{10}}) dS_{\text{аэл}}}{\int_{S_{\text{в}}} [\overline{E_{10} H}] + [\overline{E H_{10}}] dS_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{в}}$ – площадь поперечного сечения волновода, $S_{\text{аэл}}$ – площадь, занимаемая агломератами в поперечном сечении на участке L_1 , $E(x, y)$ и $H(x, y)$ – распределения полей на участке L_1 в областях поперечного сечения, заполненных агломератами, $E_{10}(x, y)$ и $H_{10}(x, y)$ – распределения полей на участке L_1 в областях

поперечного сечения, не заполненных агломератами, $\gamma_2 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu^*}$ – постоянная распространения в слоях толщиной L_2 , ω – круговая частота зондирующего электромагнитного излучения, $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\text{м}} - \varepsilon$, $\Delta \mu = \mu_{\text{м}} - \mu^*$, ε и μ^* диэлек-

трическая и магнитная проницаемости магнитной жидкости, ε_m и μ_m – диэлектрическая и магнитная проницаемости агломератов ферромагнитных наночастиц, ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная постоянные.

В расчетах учитывалось, что магнитная проницаемость μ^* магнитной жидкости является комплексной величиной и определяется через действительную χ'_m и мнимую χ''_m компоненты магнитной восприимчивости:

$$\mu^* = 1 + \chi'_m - i\chi''_m. \quad (5)$$

Величины χ'_m и χ''_m определяются выражениями [6]:

$$\chi'_m = \frac{\varphi M_d}{H} L[\xi(T)] \frac{(1 + \eta^2)^2 \omega_H^4 + (\eta^2 - 1) \omega^2 \omega_H^2}{(1 + \eta^2)^2 \omega_H^4 + 2(\eta^2 - 1) \omega^2 \omega_H^2 + \omega^4}, \quad (6)$$

$$\chi''_m = \frac{\varphi M_d}{H} L[\xi(T)] \frac{\eta \omega_H^2 (\omega^2 + \omega_H^2 (1 + \eta^2))}{(1 + \eta^2)^2 \omega_H^4 + 2(\eta^2 - 1) \omega^2 \omega_H^2 + \omega^4},$$

$$\eta = \alpha \left[\frac{1}{L[\xi(T)]} - \frac{1}{\xi(T)} \right], \quad \xi(T) = \frac{\mu_0 M_d V}{kT} H. \quad (7)$$

Здесь $L(\xi)$ – функция Ланжевена, $\omega_H = \gamma H$ – приведенное магнитное поле, ξ – суперпарамагнитный параметр (ланжевеновский аргумент) магнитной жидкости, M_d – намагниченность насыщения твердого магнетика, $V = \pi d^3/6$ – объем магнитной частицы с диаметром d , α – параметр затухания ларморовой прецессии в однодоменной частице, φ – объемная доля твердой фазы магнитной жидкости, T – температура.

Если размеры и электрофизические свойства агломератов магнитной жидкости таковы, что они слабо возмущают поле в волноводе, то с использованием соотношений $E = E_{10}$, $H = (\gamma_1/\gamma_2) H_{10}$ и выражений для электрических и магнитных полей $E(x, y)$, $H(x, y)$, $E_{10}(x, y)$ и $H_{10}(x, y)$ в волноводе уравнение (4) для нахождения $\gamma_1 = \gamma' + j\gamma''$ приобретает вид:

$$(\gamma' + j\gamma'') - \gamma_2 + \frac{\int_{S_{az}} (\Delta \varepsilon \frac{\omega^2 \pi^2}{a^2} \sin^2(\frac{\pi x}{a}) - \Delta \mu \frac{(\gamma' + j\gamma'')}{\gamma_2} \frac{\pi^2}{\mu^* \mu_0 a^2} (\gamma_2^2 \sin^2(\frac{\pi x}{a}) + \frac{\pi^2}{a^2} \cos^2(\frac{\pi x}{a}))) dS_{az}}{\int_{S_g} ((1 + \frac{(\gamma' + j\gamma'')}{\gamma_2}) \frac{\omega \pi^2}{\mu^* \mu_0 a^2} \sin(\frac{\pi x}{a}) \sqrt{\frac{\pi^2}{-a^2} \cos^2(\frac{\pi x}{a}) - \gamma_2^2 \sin^2(\frac{\pi x}{a})}) dS_g} = 0, \quad (8)$$

где a – размер широкой стенки волновода. При этом учитывалось, что с увеличением концентрации агломератов ферромагнитных наночастиц объемная доля твердой фазы в магнитной жидкости без агломератов уменьшается.

Для определения распределения агломератов ферромагнитных наночастиц слой магнитной жидкости при приложении магнитного поля с индукцией 1,15 Тл исследовался с использованием оптического микроскопа HIROX КН–7700 (рис. 8). С помощью программного пакета Gwiddion было получено распределение агломератов ферромагнитных наночастиц по длинам и толщинам.

При построении модели магнитной жидкости также учитывалось, что для стабилизации и предотвращения слипания ферромагнитных частиц в состав магнитной жидкости включается ПАВ (олеиновая кислота), которое образует моно-

молекулярный слой на поверхности ферромагнитных частиц, так называемую оболочку толщиной ~ 2 нм, которая сопоставима с размерами ферромагнитных наночастиц. С учетом коэффициента случайной плотной упаковки сфер и наличия оболочки ПАВ при расчетах в СВЧ-диапазоне длина каждого агломерата выбиралась на 50% меньше, чем определяемая оптическими методами.

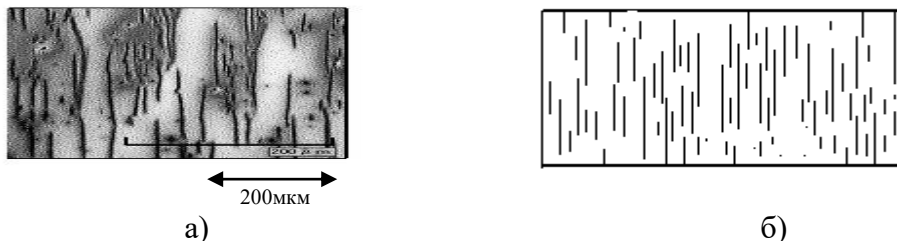


Рисунок 8 Агломераты в поперечном сечении волновода: а) фотография фрагмента слоя магнитной жидкости с использованием оптического микроскопа HIROX КН-7700; б) схематичное изображение агломератов ферромагнитных наночастиц

Таким образом, нахождение постоянной распространения $\gamma_1 = \gamma' + j\gamma''$ из решения уравнения (8) с использованием аппарата теории возмущения позволяет провести расчет коэффициента отражения электромагнитной волны R_{mm} от слоя магнитной жидкости с агломератами ферромагнитных наночастиц, представленного в виде многослойной структуры, с применением метода матриц передачи. Это позволяет с использованием выражения (3) решить обратную задачу по определению постоянной распространения $\gamma_{эфф}$. Использование в выражении (2) для расчета коэффициента отражения R в качестве постоянной распространения γ найденной величины $\gamma_{эфф}$ позволяет определить параметры магнитной жидкости из решения системы уравнений для частных производных функции $S(d, \phi, \epsilon, tg\delta, l)$, представленной в виде выражения (1), по каждому из искомым параметров, приравненных к нулю.

На рис. 9 показаны частотные экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона при различных температурах. Кривая 1 рассчитана без учета агломератов ферромагнитных наночастиц, кривая 2 рассчитана с учетом агломератов, образующихся при величине внешнего магнитного поля с индукцией 1,15 Тл, распределенных по объему магнитной жидкости. Из результатов, приведенных на рис.9, следует, что частотная зависимость, рассчитанная с учетом пространственного распределения агломератов, в большей степени совпадает с экспериментальными данными, показанными на рис. 9 треугольниками, чем зависимость, рассчитанная по теории высокочастотного намагничивания ансамбля невзаимодействующих изотропных суперпарамагнитных частиц.

На рис. 10 и 11 представлены зависимости функции невязок $S(d, \phi, \epsilon, tg\delta, l)$ от искомым параметров, показывающие, что существует единственная комбинация параметров магнитной жидкости, при которой достигается глобальный минимум функции невязок, т.е. единственное решение.

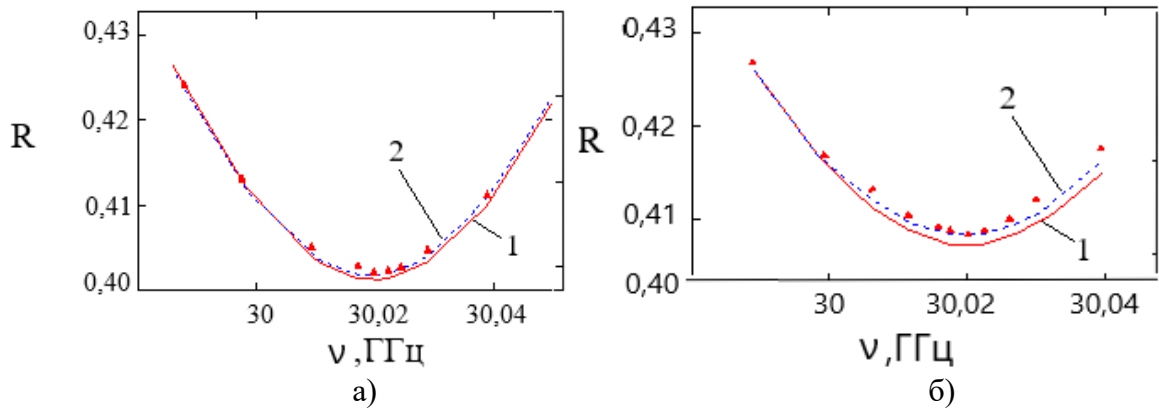


Рисунок 9 Частотные зависимости коэффициента отражения от слоя магнитной жидкости при температуре 293 К (а) и температуре 253 К (б), экспериментальные точки показаны треугольниками: 1 – частотная зависимость для модели высокочастотного намагничивания ансамбля невзаимодействующих изотропных суперпарамагнитных частиц; 2 – частотная зависимость с учетом наличия агломератов из наночастиц магнетита, образующихся под действием магнитного поля, распределенных по объему магнитной жидкости

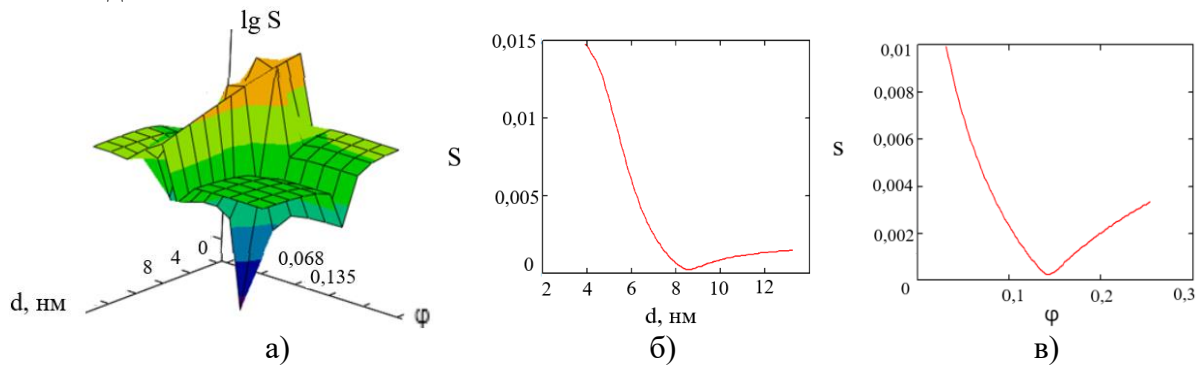


Рисунок 10 Зависимость функции невязок S от искомых параметров: а) логарифмическая зависимость функции невязок S от диаметра магнетитовых частиц d и объемной доли твердой фазы φ ; б) зависимость функции невязок S от диаметра магнетитовых частиц d ; в) зависимость функции невязок S от объемной доли твердой фазы φ

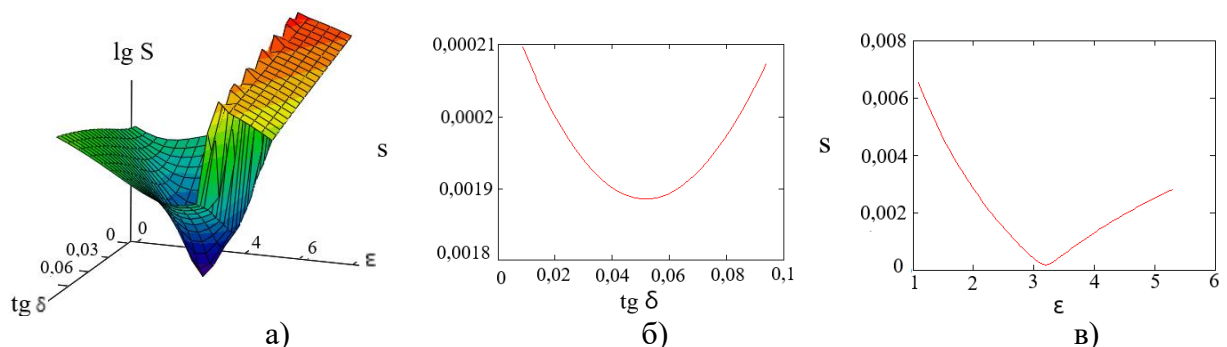


Рисунок 11 Зависимость функции невязок S от искомых параметров: а) логарифмическая зависимость функции невязок S от диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$; б) зависимость функции невязок S от диэлектрической проницаемости ϵ ; в) зависимость функции невязок S от тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$

В результате решения обратной задачи были определены средний диаметр магнетитовых частиц (8,28 нм), объемная доля твердой фазы (0,135), диэлектрическая проницаемость (3,19) и тангенс угла диэлектрических потерь (0,052). Для

количественной оценки сходимости теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента отражения от слоя магнитной жидкости было рассчитано среднее квадратическое отклонение (СКО). Для модели высокочастотного намагничивания ансамбля невзаимодействующих изотропных суперпарамагнитных частиц, используемой, например, в [2, 6], значение СКО в диапазоне 27–34 ГГц составило $P_1=8,6 \cdot 10^{-6}$. Для модели, предложенной в настоящей работе, значение СКО составило $P_2=5,0 \cdot 10^{-6}$, что в 1,7 раза меньше, чем P_1 .

Таким образом, учет пространственного распределения агломератов ферромагнитных наночастиц в магнитной жидкости позволяет добиться лучшего согласования экспериментальных данных и результатов расчетов, что свидетельствует о правильном выборе модели магнитной жидкости и открывает возможность повышения точности в определении ее параметров.

Отметим, что на описанный способ определения параметров магнитной жидкости получен патент на изобретение РФ №2679457.

В четвертом разделе показана возможность модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения при прохождении через магнитную жидкость и суспензию магнитной жидкости с нанотрубками при изменении направления вектора индукции воздействующего магнитного поля.

В настоящей работе изучалось прохождение линейно поляризованного оптического излучения через магнитную жидкость с многостенными нанотрубками, имеющими длину 2 мкм, внутренний 3–8 нм и наружный диаметр 20–40 нм. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер на квантоворазмерных структурах с длиной волны 650 нм.

При параллельном расположении нитевидных агломератов ферромагнитных наночастиц, выстроенных вдоль вектора индукции внешнего магнитного поля, и электрической составляющей линейно поляризованного лазерного излучения должно наблюдаться максимальное взаимодействие поля с поглощающими его энергию агломератами. Если агломераты расположены перпендикулярно электрической компоненте лазерного излучения, то поглощение энергии поля должно быть минимальным, если вдоль – максимальным.

Таким образом, изменяя направление вектора индукции воздействующего на магнитную жидкость магнитного поля, можно модулировать прошедшую через нее мощность лазерного излучения. При введении в магнитную жидкость нанотрубок наблюдается их агломерация вдоль нитевидных агломератов ферромагнитных наночастиц, в результате чего увеличивается результирующая толщина и проводимость агломератов, представляющих собой композиты из ферромагнитных наночастиц и нанотрубок. Следовательно, должна существенно увеличиваться глубина модуляции прошедшего излучения.

Для визуализации агломератов ферромагнитных наночастиц и агломератов ферромагнитных частиц и нанотрубок было проведено высушивание тонкого слоя магнитной жидкости и магнитной жидкости с нанотрубками. На рис. 12 а,б представлены фрагменты тонкого слоя магнитной жидкости и магнитной жидкости с нанотрубками, высушенного в магнитном поле. Изображения были получены на оптическом микроскопе HIROXKH–7700.

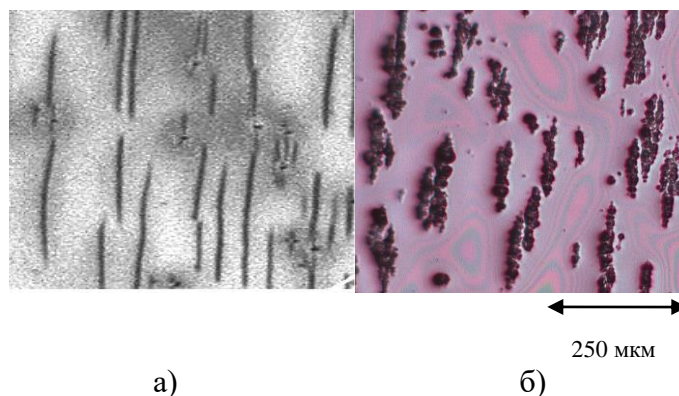


Рисунок 12 Тонкий слой магнитной жидкости, высушенный во внешнем магнитном поле с индукцией 0,2 Тл: а) без нанотрубок; б) с многостенными нанотрубками
Экспериментальная установка показана на рис. 13.

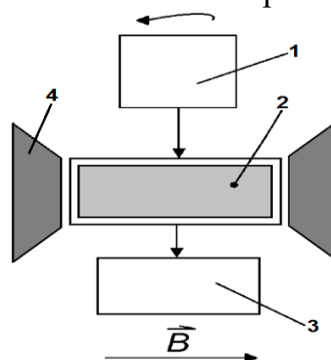


Рисунок 13 Схема экспериментальной установки: 1 – источник лазерного излучения с длиной волны $\lambda=650$ нм, 2 – ячейка с магнитной жидкостью, 3 – фотодиод, 4 – обкладки электромагнита

На рис. 14 приведена зависимость напряжения на фотодиоде от угла α между вектором электрической компоненты лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля для суспензий с различной концентрацией нанотрубок.

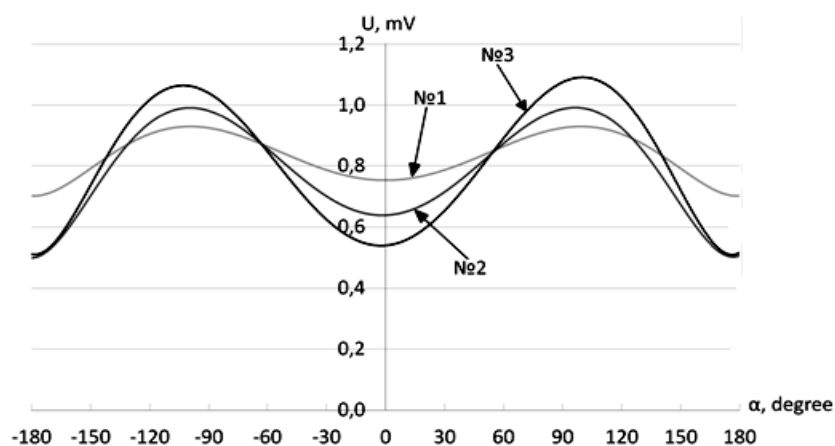


Рисунок 14 Зависимость напряжения на фотодиоде от угла между вектором электрического поля лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля для суспензий с различной концентрацией нанотрубок (№1 – магнитная жидкость без нанотрубок, №2 – магнитная жидкость с нанотрубками с концентрацией 10 г/л, №3 – с концентрацией нанотрубок 40 г/л)

В зависимости от угла поворота лазера изменялась интенсивность прошедшего через ячейку лазерного излучения вследствие изменения ориентации электрической компоненты лазерного излучения относительно нитей, образованных ферромагнитными частицами и нанотрубками.

Коэффициент прохождения оптического излучения через магнитную жидкость в отсутствие магнитного поля составлял 7%.

Глубина модуляции отраженного лазерного излучения была вычислена на формуле: $M = (I_{fmax} - I_{fmin}) / I_{fmax}$ и составила 22% для магнитной жидкости без нанотрубок, 37 % для суспензии с концентрацией нанотрубок 10 г/л и 54 % для суспензии с концентрацией нанотрубок 40 г/л.

Таким образом, показана возможность модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения при прохождении через магнитную жидкость и суспензию магнитной жидкости с нанотрубками в магнитном поле. В последнем случае достигается глубина модуляции свыше 50%.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Установлено, что процессы структурообразования в исследуемой магнитной жидкости под действием внешнего магнитного поля, приводящие к возникновению агломератов ферромагнитных наночастиц и изменению намагниченности магнитной жидкости, носят пороговый характер. Определены три пороговые величины индукции магнитного поля для магнитной жидкости на основе керосина с диаметром феррочастиц $d = 5 \div 10$ нм, стабилизированных олеиновой кислотой, объемной долей твердой фазы $\varphi = 0,1$.

2. Выявлено, что с ростом магнитной индукции в диапазоне от 0 до 0,02 Тл однодоменные ферромагнитные наночастицы диаметром $d = 5 \div 10$ нм объединяются в агломераты микронных размеров. При значениях индукции магнитного поля, больших 0,02 Тл, вплоть до значения индукции магнитного поля 0,1 Тл наблюдалось увеличение числа агломератов, при этом броуновское движение ферромагнитных наночастиц препятствует образованию агломератов, среднее значение длин которых превышает 38 мкм при комнатной температуре.

3. Показано, что при значениях индукции магнитного поля, больших 0,1 Тл, с возрастанием сил магнитодипольного взаимодействия между агломератами ферромагнитных наночастиц наблюдался резкий рост размеров агломератов до 248 мкм за счет объединения агломератов с меньшими размерами. При превышении значения индукции магнитного поля 0,13 Тл размеры агломератов практически перестали изменяться.

4. Установлено, что зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины приложенного магнитного поля носит пороговый характер и обусловлена изменением размеров агломератов, образованных наноразмерными магнетитовыми частицами магнитной жидкости на основе керосина под воздействием приложенного магнитного поля с индукцией до 1,2 Тл, их концентрацией, ориентацией относительно компонент электромагнитной волны и величиной намагниченности агломератов ферромагнитных наночастиц.

5. Предложена модель формирования структуры магнитной жидкости, характеризующейся наличием агломератов ферромагнитных наночастиц, их концентрацией, ориентацией и намагниченностью в магнитном поле с индукцией до 1,2 Т, позволяющая корректно описать особенности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с ферромагнитными наночастицами, входящими в состав магнитной жидкости.
6. Показано согласование теоретически рассчитанных и экспериментально полученных спектров отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от слоя магнитной жидкости, помещенной в измерительную систему.
7. На основе предложенной модели формирования структуры магнитной жидкости с учетом эффектов, обусловленных агломерацией ферромагнитных наночастиц, и наличия у них оболочек поверхностно-активных веществ адекватно решена обратная задача по определению параметров магнитной жидкости (среднего диаметра магнетитовых частиц, объемной доли твердой фазы, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) с использованием частотных зависимостей коэффициентов отражения в СВЧ-диапазоне при нескольких значениях температур.
8. Экспериментально реализован способ модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах, проходящего через магнитную жидкость, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением вектора магнитной индукции и с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц с размером, превышающем длину волны оптического излучения.
9. Установлено, что глубина модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения ($\lambda=650$ нм), проходящего через магнитную жидкость, при изменении направления вектора индукции магнитного поля с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц, увеличивается до 37 – 54% при добавлении многостенных углеродных нанотрубок с длиной ~ 2 мкм, наружным 15–40 нм и внутренним диаметром 3–8 нм с концентрацией в диапазоне 10–40 г/л.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science) и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Бочкова Т.С., Игонин С.В., Усанов Д.А., Постельга А.Э. Определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости спектра отражения сверхвысокочастотного излучения с учетом образованных агломератов ферромагнитных наночастиц // Дефектоскопия. 2018. №8. С.41–49.
2. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н. Динамика агломерации наночастиц в магнитной жидкости при изменении магнитного поля // ЖТФ. 2016. Т. 86, № 3. С. 146–148.
3. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н., Игонин С.В. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением // ЖТФ. 2017. Т. 87, № 6. С. 1432–1435.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

4. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гуров К.А., Игонин С.В. Многопараметровые измерения структур сверхвысокочастотными волноводными методами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т.21, №3. С.12–17.

В других изданиях

5. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Игонин С.В. Способ определения параметров магнитной жидкости // Патент на изобретение РФ №2679457. Опубликовано: 11.02.2019. Бюл. № 5.

6. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Игонин С.В. Применение теории возмущений для решения обратной задачи по определению параметров магнитной жидкости с учетом агломератов ферромагнитных наночастиц// В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей пятой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова.– Саратов: Изд–во «Саратовский источник», 2018. С.126–129.

7. Бочкова Т.С., Игонин С.В., Усанов Д.А., Постельга А.Э. Влияние учета агломератов ферромагнитных наночастиц на определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости спектра отражения сверхвысокочастотного излучения // В сборнике: 18–я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям, 2018. С. 341–352.

8. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н. Агломерация наночастиц магнитной жидкости в магнитном поле // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: Изд–во «Саратовский источник», 2015.С.67–69.

9. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н., Игонин С.В. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы четвертой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. Саратов: Изд–во «Саратовский источник», 2017. С.31–34.

10. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н., Игонин С.В. Модель взаимодействия магнитной жидкости, помещенной во внешнее магнитное поле, с электромагнитной волной СВЧ диапазона // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей шестой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. Саратов: Изд–во «Саратовский источник», 2019. С.151–155.

Цитируемая литература

1. Stergiou C.A., Koledintseva M.Y., Rozanov K.N. Hybrid polymer composites for electromagnetic absorption in electronic industry // Hybrid Polymer Composite Materials: Applications. 2017. P. 53–106.

2. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э., Райхер Ю.Л., Степанов В.И. Температурная зависимость коэффициента отражения микроволнового излучения от слоя магнитной жидкости // ЖТФ. 2006. Т.76, №11. С.126–129.

3. Кожевников В.М., Падалка В.В., Райхер Ю.Л., Чеканов В.В. Оптическая анизотропия магнитной жидкости в скрещенных электрическом и магнитном полях // Изв. АН СССР. Сер.физ. 1987. Т.51, № 6.С.1042–1048.

4. Islam M.F., Lin K. H., Lacoste D., Lubensky T. C., Yodh A. G. Field-induced structures in miscible ferrofluid suspensions with and without latex spheres // J. Magn. Magn. Mat. 2003. V.67. P. 021402.

5. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Курганов А.В. Определение параметров магнитной жидкости по отражению сверхвысококачастотного излучения // ЖТФ. 2001. Т.71, №12. С.26–29.

6. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Алтынбаев С.В. Определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости сверхвысококачастотного спектра отражения // ЖТФ. 2013. Т. 83, №. 11. С. 30–33

7. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э. Частотная зависимость коэффициента отражения СВЧ излучения от магнитной жидкости в области азотных температур // ЖТФ. 2009. Т.79, №9. С.146–148.

8. Никольский В.В. Гиротропное возмущение волновода // Радиотехника и электроника. 1957. Т.2, №2. С.157–171.

БОЧКОВА ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОКАСТОТНОГО И ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНОВ С ФОРМИРУЮЩИМИСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
АГЛОМЕРАТАМИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ
МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико–математических наук

Подписано в печать г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ №

Типография «Техно-Декор».
Саратов, Московская, 160, тел.: 77-07-48, www.sar-print.ru.